



Sobre a utilização de varões embebidos para o reforço ao corte de vigas de betão armado

On the use of embedded bars for shear strengthening of RC beams

Gláucia Dalfré (1) e Joaquim Barros (2)

(1) Professor doutor - UNILA; Membro do ISISE - Universidade do Minho

(2) Professor Catedrático, ISISE - Universidade do Minho

Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Av. Tancredo Neves, 6731 Foz do Iguaçu Brasil

ISISE - Depto de Engenharia Civil - Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães Portugal

Resumo

A técnica de reforço baseada na utilização de varões embebidos para o reforço ao corte de vigas de betão armado (BA), designada na literatura inglesa por "Embedded Through-Section (ETS)", é relativamente recente e consiste na instalação de varões em furos abertos na espessura do elemento a reforçar, com inclinações desejadas, sendo fixos ao betão por meio de adesivos. Para avaliar a eficácia desta técnica, um programa experimental composto por 16 vigas de BA foi realizado e os resultados obtidos revelaram um significativo aumento da capacidade máxima de carga e deformação. De forma a obter um melhor entendimento sobre a utilização dos varões embebidos aplicados segundo a técnica ETS na resistência ao corte de vigas de BA, uma análise numérica com o uso de um programa de cálculo automático baseado no método dos elementos finitos foi realizada. De acordo com os resultados, uma boa concordância entre os valores experimentais e numéricos foram obtidos.

Palavra-Chave: Materiais adesivos, Varões embebidos, Análise Numérica, Reforço ao corte, Técnica ETS

Abstract

Embedded Through-Section (ETS) technique is a relatively recent shear strengthening strategy for reinforced concrete (RC) beams, and consists on opening holes across the beam thickness, with the desired inclinations, where bars are introduced and are bonded to the concrete substrate with adhesive materials. To assess the effectiveness of this technique, a comprehensive experimental program composed of 16 RC beams was carried out and the obtained results reveal a significant increase in terms of ultimate load and deflection. To have a better assessment of the contribution of the ETS bars for the shear resistance of RC beams, numerical analysis were performed with a FEM-based computer program. A good agreement between the experimental and numerical values was obtained.

Keywords: Adhesive materials, Embedded bars, Numerical simulation, Shear strengthening, ETS technique



1 Introdução

As estruturas de betão armado (BA) são projetadas para um determinado período de vida útil, durante o qual devem exibir níveis adequados de segurança, funcionalidade e durabilidade. Verifica-se no entanto, situações em que os níveis de segurança não são satisfatórios. Neste âmbito, uma intervenção de reforço ao esforço transversal de um elemento estrutural de BA pode ser provocada por falhas de projeto/execução, aumento da carga de utilização, redução da resistência dos materiais resultante da sua degradação (corrosão das armaduras, degradação do betão), por alterações nos códigos de dimensionamento ou pela ocorrência de acidentes (sismos, incêndios, explosões, cheias ou atos de vandalismo). Além disso, refira-se também os casos de elementos estruturais que, posteriormente a uma intervenção de reforço à flexão, o seu modo de rotura passa a ser por corte. Esta ocorrência não é recomendável, devendo ser evitada, uma vez que a rotura por corte é frágil e quase instantânea (sem aviso).

Para atender a estes objetivos, materiais alternativos e novas técnicas de reforço e recuperação de estruturas começaram a ser estudados. As técnicas tradicionais de reforço ao corte de vigas de BA são encamisamento das seções (VIANA, 2004), colagem de elementos metálicos e aplicação de pré-esforço exterior. Entretanto, estudos experimentais realizados sobre o reforço ao corte de vigas de BA com compósitos de CFRP, aplicados segundo as técnicas EBR (Externally Bonded Reinforcement) ou NSM (Near Surface Mounted), demonstram que estas técnicas podem proporcionar soluções globalmente tão ou mais eficazes que as soluções de reforço tradicionais (DIRAR et al., 2007; BASLER et al., 2003; De LORENZIS e NANNI; 2001). No entanto, a EBR apresenta baixa mobilização da capacidade resistente do material devido ao fenómeno de destacamento precoce dos FRP's (polímeros reforçados com fibras) e ambas as técnicas não têm aplicabilidade no reforço ao corte de lajes.

Alguns trabalhos recentemente publicados (CHAALAL et al., 2011; VALERIO et al. 2005; VALERIO et al., 2009) lidam com a utilização da técnica de reforço ao corte baseada na instalação de varões em furos abertos na espessura do elemento a reforçar, fixos ao betão por meio de adesivos, designada por ETS ("Embedded Through-Section", em língua inglesa). Os resultados obtidos nestes trabalhos permitiram concluir que a utilização de varões como elementos resistentes ao corte permite aumentos significativos da capacidade máxima de carga de elementos de BA com rotura por corte. Para além disso, este sistema de reforço está mais protegido das condições de agressividade ambiental e de atos de vandalismo, pois os elementos de reforço encontram-se embebidos no betão.

No presente trabalho, utilizando-se os resultados obtidos no programa experimental realizado por Dalfré (2013), bem como os resultados de programas experimentais preliminares (BARROS et. al, 2008; DALFRÉ et. al, 2008, DALFRÉ et. al, 2011), o desempenho de um modelo numérico implementado em um programa de computador baseado no método dos elementos finitos (MEF) foi avaliado. Com a ajuda deste software, um melhor entendimento sobre o comportamento de vigas de BA reforçadas ao corte com varões de aço aplicados segundo a técnica ETS foi obtido.



2 Programa Experimental

2.1 Concepção das vigas

Uma campanha experimental constituída por dezasseis vigas de betão armado divididas em duas séries (A e B) foi realizada. As características geométricas e as armaduras longitudinais das vigas das séries A e B encontram-se representadas na Figura 1. Todas as vigas tinham um vão de corte ($a = 900$ mm) igual a três vezes a altura da seção transversal ($a/h = 3$). Devido a limitação de páginas, somente a série A será apresentada neste trabalho. Detalhes da Série B são apresentados em DALFRÉ et. al (2011). Das dezasseis vigas que constituem o programa experimental, oito para cada Série, duas foram ensaiadas sem qualquer tipo de armadura de corte ou reforço (referência), e doze vigas foram reforçadas ao corte com diferentes soluções em termos de orientação e de materiais de reforço empregados (Figura 2). Foram testadas quatro soluções de reforço ao corte, nomeadamente: (i) Reforço com estribos de aço verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro, espaçados de 225 mm ou 300 mm; (ii) Reforço com varões de aço embebidos em adesivo epoxídico, aplicados segundo a técnica ETS, dispostos verticalmente ou inclinados a 45° relativamente ao eixo da viga, e espaçados de 300 mm; (iii) Reforço composto por estribos de aço verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro, espaçados de 300 mm, e reforço com varões de aço embebidos em adesivo epoxídico, aplicados segundo a técnica ETS, dispostos verticalmente ou inclinados a 45° relativamente ao eixo da viga, também espaçados de 300 mm e (iv) Reforço composto por estribos de aço verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro, espaçados de 225 mm, e reforço com varões de aço embebidos em adesivo epoxídico, aplicados segundo a técnica ETS, dispostos verticalmente, também espaçados de 225 mm. Foram efetuadas duas betonagens, cada uma delas com a quantidade suficiente de betão para a betonagem de oito vigas de betão armado, também apresentadas na Tabela 1.

A ocorrência de rotura por corte foi uma condição inicialmente imposta, de forma que se pudesse avaliar o contributo do reforço ao esforço transversal em toda a sua plenitude. Assim, no pré-dimensionamento dos modelos ensaiados, foi necessário garantir que a carga de rotura das vigas (tendo em conta a resistência ao esforço transversal) fosse inferior à carga de rotura das vigas em termos de flexão. Foi ainda definido que a zona de reforço seria delimitada a um dos vãos da viga. Assim, as vigas foram sujeitas a ensaios à flexão em três pontos de carga, sendo que a rotura por corte foi imposta a um dos vãos de corte da viga (a). Para tal, as vigas foram suficientemente estribadas no outro vão de corte (b). Com efeito, de forma a evitar que a rotura por corte ocorresse no maior vão (b) foram aí colocados estribos verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro afastados de 75 mm (Figura 2).

2.2 Propriedade dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão utilizado na concepção das vigas, cuja composição foi efetuada experimentalmente aos 28 dias. Para tal, de acordo com a especificação do LNEC E397 (1993), efetuaram-se ensaios de compressão uniaxial sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de cinco tipos de varões de aço nervurado do tipo A500NR, com diâmetros de 6, 8, 10, 12 e 25 mm. A avaliação do comportamento à tração do adesivo utilizado para fixação dos varões de reforço, com a designação comercial de Sikadur 32N, foi efetuada experimentalmente por intermédio de ensaios de tração uniaxial segundo a norma ISO 527-5

(1993). Os resultados de caracterização das propriedades dos materiais podem ser encontrados noutra publicação (DALFRÉ et. al, 2011).

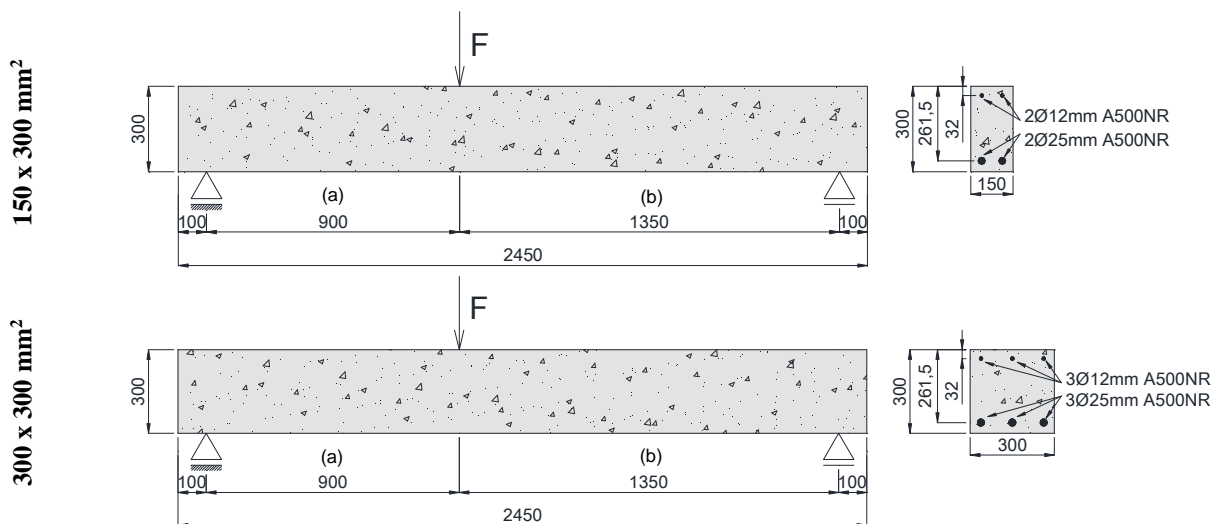


Figura 1 – Modelos ensaiados (dimensões em mm).

Tabela 1 – Detalhes das duas séries de vigas ensaiadas (ver Figura 2).

Identificação dos provetes	150 x 300 mm ²					300 x 300 mm ²				
	Idade do sistema de reforço à data do ensaio (dias)	ρ_{sl} (%)	ρ_{sw} (%)	ρ_f (%)	Betonagem	Idade do sistema de reforço à data do ensaio (dias)	ρ_{sl} (%)	ρ_{sw} (%)	ρ_f (%)	Betonagem
Referência	-----	2.50	0.00	0.00	1	-----	1.88	0.00	0.00	1
S-300-90°	-----	2.50	0.13	0.00	1	-----	1.88	0.06	0.00	1
S-225-90°	-----	2.50	0.17	0.00	2	-----	1.88	0.08	0.00	2
ETS-300-90°	34	2.50	0.00	0.17	1	65	1.88	0.00	0.11	1
ETS-300-45°	34	2.50	0.00	0.25	2	64	1.88	0.00	0.16	2
S-300-90°/ETS-300-90°	33	2.50	0.13	0.17	1	69	1.88	0.06	0.11	1
S-300-90°/ETS-300-45°	29	2.50	0.13	0.25	2	68	1.88	0.06	0.16	2
S-225-90°/ETS-225-90°	35	2.50	0.17	0.23	2	72	1.88	0.08	0.15	2

ρ_{sl} (percentagem de armadura longitudinal): $\rho_{sl} = (A_{sl} / b_w \cdot d) \times 100$; ρ_{sw} (percentagem de armadura transversal): $\rho_{sw} = (A_{sw} / b_w \cdot d) \times 100$; ρ_f (reforço ao corte): $\rho_f = (A_f / b_w \cdot s_f \cdot \sin \theta_f) \times 100$; b_w = largura da secção transversal; d = largura útil da secção transversal; A_{sl} = área da secção transversal da armadura longitudinal de tração; A_{sw} = área da secção transversal dos ramos que formam os estribos; s_w = espaçamento entre estribos; A_f = área da secção transversal de cada um dos varões de reforço; s_f = espaçamento entre varões de reforço; θ_f : inclinação dos varões de reforço em relação ao eixo da viga.

Identificação dos provetes		Solução de reforço ao corte	Posicionamento do reforço ao corte	Secção no vão de corte
A.1	Referência (Ref.)	-----		
A.2	S-300-90°	Estribos de aço verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro, espaçados de 300 mm		
A.3	S-225-90°	Estribos de aço verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro, espaçados de 225 mm		
A.4	ETS-300-90°	Varões de aço verticais de 10 mm de diâmetro, embebidos em adesivo epoxídico, aplicados segundo à técnica ETS, espaçados de 300 mm		
A.5	ETS-300-45°	Varões de aço de 10 mm de diâmetro, inclinados a 45°, embebidos em adesivo epoxídico, aplicados segundo à técnica ETS, espaçados de 300 mm		
A.6	S-300-90°/ ETS-300-90°	Estribos de aço verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro, espaçados de 300 mm + varões de aço verticais de 10 mm de diâmetro, embebidos em adesivo epoxídico, aplicados segundo à técnica ETS, espaçados de 300 mm		
A.7	S-225-90°/ ETS-225-90°	Estribos de aço verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro, espaçados de 225 mm + varões de aço verticais de 10 mm de diâmetro, embebidos em adesivo epoxídico, aplicados segundo à técnica ETS, espaçados de 225 mm		
A.8	S-300-90° ETS-300-45°	Estribos de aço verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro, espaçados de 300 mm + varões de aço de 10 mm de diâmetro, inclinados a 45°, embebidos em adesivo epoxídico, aplicados segundo à técnica ETS, espaçados de 300 mm		

Figura 2 – Detalhes da Série A (dimensões em mm).

2.3 Sistema de ensaio e instrumentação das vigas

Na Figura 3 apresenta-se o esquema do ensaio das vigas das séries A e B e o sistema de monitorização para registo da deformação da viga e das extensões nos estribos e varões de reforço. A carga aplicada foi registada por intermédio de uma célula de carga de 500 kN, e a deformação da viga foi determinada por meio de quatro transdutores de deslocamentos (LVDT's) colocados segundo o arranjo representado na Figura 3(a) e apoiados num sistema que evita o registo de deslocamentos parasitas ("Japanese Yoke"). Os ensaios foram controlados por intermédio do LVDT 3558, colocado na secção de aplicação da carga, tendo-se utilizado uma variação constante de deslocamento de 20 $\mu\text{m/s}$. Os estribos posicionados no vão de corte "a" foram instrumentados com dois ou três extensómetros eléctricos (S1 a S3) segundo o arranjo representado na Figura 3(b). Nos varões aplicados segundo a técnica ETS em cada uma das vigas reforçadas foram instalados extensómetros eléctricos (1 a 8), de acordo com o arranjo indicado na Figura 3(b).

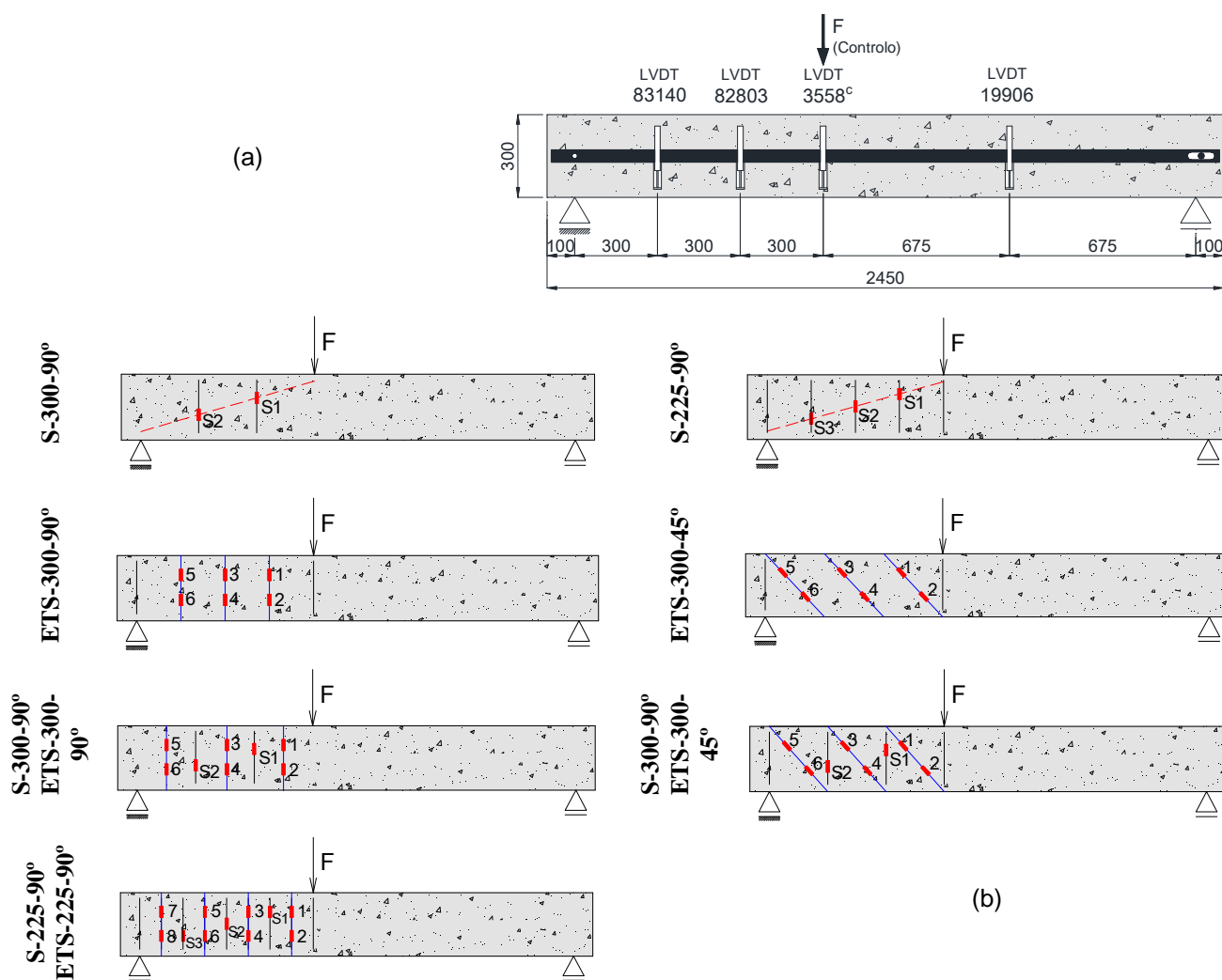


Figura 3 - Posicionamento de (a) LVDTs e (b) extensómetros nos estribos e varões de reforço ETS (dimensões em mm).

2.5 Apresentação e análise dos resultados

Na Figura 4 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total e o deslocamento no ponto de aplicação da carga das vigas das Séries A e B. Na Tabela 2 apresentam-se os valores obtidos para a carga máxima, F_{\max} , deslocamento na secção solicitada correspondente a F_{\max} , $\delta_{F_{\max}}$, e os indicadores da eficácia das soluções de reforço ao corte adoptadas em termos de aumento da capacidade máxima de carga e de deformação na rotura das vigas. Além disso, apresenta-se o respectivo valor da resistência máxima ao esforço transversal (V_{total}), a contribuição do betão (V_c), dos estribos de aço (V_s) e dos varões de reforço (V_f) na resistência ao corte das vigas ensaiadas, bem como a máxima extensão nos estribos de aço ($\varepsilon_{s,F_{\max}}$) e nos varões de reforço ($\varepsilon_{f,F_{\max}}$) para a carga máxima. O valor da resistência ao esforço transversal de cada uma das vigas ensaiadas (V_{total}) foi quantificado a partir do respectivo valor da força máxima registada no ensaio (F_{\max}).

Tendo em conta o modelo estrutural das vigas, para o caso das Séries A e B (ver Figura 1) o valor de V_{total} foi obtido por:

$$V_{\text{total}} = 0.6F_{\max} \quad (1)$$

Adoptando o mesmo princípio que é utilizado nos códigos de dimensionamento para a quantificação da parcela resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado, tem-se:

$$V_{\text{total}} = V_c + V_s + V_f \quad (2)$$

ou seja, às contribuições do betão (V_c) e dos estribos de aço (V_s) é adicionada a contribuição do reforço ao corte com varões aplicados segundo à técnica ETS. Os resultados registados no presente programa de ensaios permitem constatar que:

(i) A presença dos varões de reforço ao corte, independentemente da sua percentagem e orientação, permite aumentos significativos da capacidade de carga e da capacidade de deformação de vigas de betão armado com rotura por corte. Além disso, a solução de reforço adoptada permitiu, em alguns casos, a mudança do modo de rotura frágil por corte para dúctil por flexão;

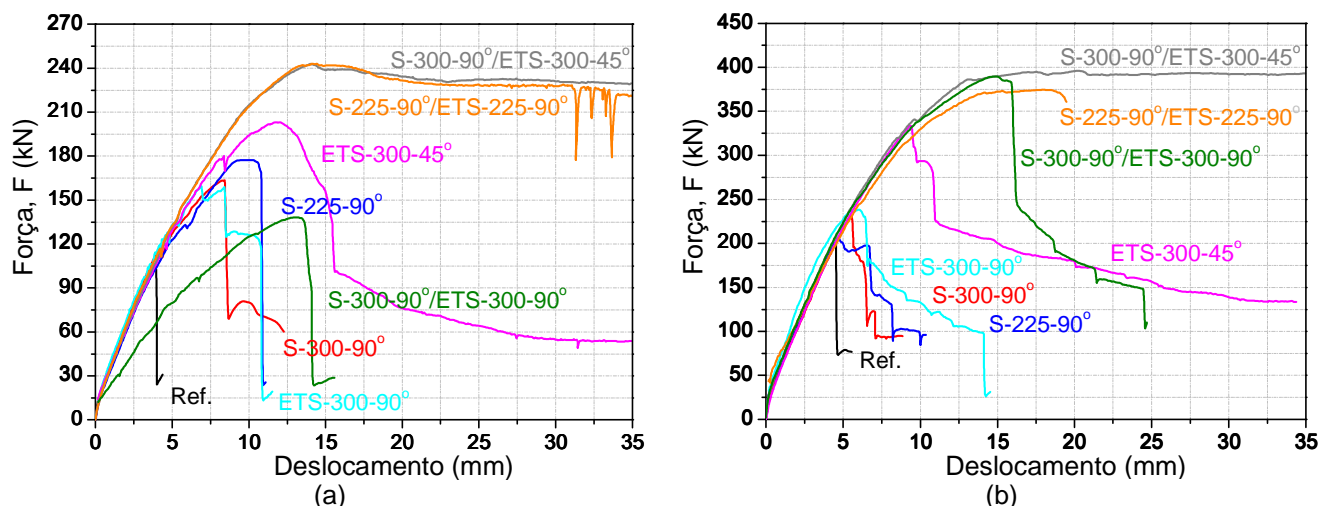


Figura 4 – Resultados experimentais das séries: (a) A; (b) B.

Tabela 2 – Resumo dos resultados obtidos no programa experimental.

Designação das vigas			F_{\max} (kN)	$\frac{\Delta F_{\max}}{F_{\max}^{REF}}$ (%)	$\delta_{F \max}$ (mm)	$\frac{\Delta \delta_{F \max}}{\delta_{F \max}^{REF}}$ (%)	V_{total} (kN)	V_c (kN)	V_s (kN)	V_f (kN)	$\epsilon_{s, F \max}$ (‰)	$\epsilon_{f, F \max}$ (‰)
Série A	A.1	Ref.	108.86	-----	4.01	-----	65.32	65.32	-----	-----	-----	-----
	A.2	S-300-90°	164.67	51.27	8.40	109.58	98.80		33.48	-----	2.73 (S2)	-----
	A.3	S-225-90°	180.31	65.63	9.92	147.32	108.19		42.87	-----	4.27 (S2)	-----
	A.4	ETS-300-90°	160.78	47.69	6.97	73.96	96.47		-----	31.15	-----	2.15 (1)
	A.5	ETS-300-45°	203.98	87.38	12.04	200.25	122.39		-----	57.07	-----	2.07 (4)
	A.6	S-300-90°/ ETS-300-90°	231.83	112.96	13.12	227.18	139.10		33.48	40.30	2.44 (S2)	2.57 (1)
	A.7	S-300-90°/ ETS-300-45°	244.41	124.52	14.00	249.21	146.65		33.48	47.85	2.41 (S1)	2.95 (6)
	A.8	S-225-90°/ ETS-225-90°	244.17	124.30	14.44	260.10	146.50		42.87	38.31	2.08 (S3)	2.60 (1)
Série B	B.1	Ref.	203.36	-----	4.45	-----	122.02	122.02	-----	-----	-----	-----
	B.2	S-300-90°	232.31	14.24	5.56	24.94	139.39		17.37	-----	1.66 (S2)	-----
	B.3	S-225-90°*	207.23*	1.90	4.72	6.07	124.34*		2.32*	-----	0.64 (S3)	-----
	B.4	ETS-300-90°	238.88	17.47	6.06	36.18	143.33		-----	21.31	-----	0.53 (1)
	B.5	ETS-300-45°	336.19	65.32	9.42	111.68	201.71		-----	79.69	-----	1.97 (4)
	B.6	S-300-90°/ ETS-300-90°	390.11	91.83	15.01	237.30	234.07		17.37	94.68	2.91 (S1)	2.54 (3)
	B.7	S-300-90°/ ETS-300-45°	396.51	94.97	20.18	353.48	237.91		17.37	98.52	danif.	4.77 (1)
	B.8	S-225-90°/ ETS-225-90°	375.33	84.56	17.88	301.80	225.20		2.32*	100.86*	5.43 (S3)	1.96 (1)

(valor)= designação do extensômetro onde a maior extensão foi registada, danif. = extensômetro foi danificado durante o ensaio, * A viga S-225-90° apresentou capacidade de carga inferior a esperada.

(ii) Tendo por base os resultados obtidos nos provetes não reforçados (A.1 e B.1), verificou-se que os provetes armados com estribos verticais de aço (A.2 e B.2) ou reforçados com varões verticais aplicados segundo a técnica ETS (A.4 e B.4) apresentaram um aumento da carga máxima de 51% e 48%, respectivamente (no caso da Série A), e 14% e 17% (no caso da Série B). Tendo por base os resultados obtidos nos provetes não reforçados, verificou-se que os provetes reforçados com estribos de aço ou com varões aplicados segundo a técnica ETS apresentaram uma capacidade deformacional, respectivamente, 110% e 74% superior para as vigas da Série A, e de 25% e 36% superior para as vigas da Série B.

(iii) O melhor desempenho em termos de carga máxima e capacidade deformacional da viga na sua rotura foi garantido pelos varões inclinados a 45°. Tal deve-se ao facto da inclinação da fenda de rotura ser aproximadamente ortogonal à orientação dos varões inclinados, e ao maior comprimento de amarração obtido nesta configuração de reforço. Tendo por base os resultados obtidos nos modelos reforçados A.4 e B.4, verificou-se que os modelos A.5 e B.5, reforçados com varões inclinados a 45°, apresentaram um aumento da carga máxima de 27% e 41% para as vigas das Séries A e B, respectivamente.

(iv) Quanto à capacidade deformacional, verificou-se um incremento de 72% e 55% com relação aos modelos com varões de reforço verticais, espaçados de 300 mm, das Séries A e B, respectivamente.

(v) Da análise dos valores incluídos na Tabela 2 verifica-se que as maiores extensões foram obtidas na solução de reforço que combina os estribos de aço com os varões aplicados segundo a técnica ETS. As extensões registadas nos varões de esforço ETS variaram entre 2.57 a 2.95 ‰ para a Série A e entre 1.96 ‰ a 4.77 ‰ para a Série B, respectivamente.

3 Simulação do comportamento de vigas reforçadas ao corte com varões embebidos aplicados segundo à técnica ETS

Com o objectivo de calibrar e validar os modelos numéricos, procedeu-se à realização de simulações numéricas dos ensaios experimentais previamente apresentados. A simulação do comportamento das vigas de betão armado reforçadas com varões embebidos aplicados segundo a técnica ETS foi realizada com o auxílio do programa “Femix”, baseado no método dos elementos finitos (MEF). Este programa inclui modelos constitutivos capazes de simular o início e propagação da fissuração do betão, o comportamento não-linear de compressão do betão e o comportamento elasto-plástico do aço, o amolecimento de ambos os materiais, os modos de fratura I e II do concreto. A descrição detalhada deste modelo pode ser encontrada em outro lugar (Ventura-Gouveia, 2011).

Leis constitutivas para os materiais

Para simular o comportamento da armadura longitudinal, estribos e barras de reforço ETS adotou-se a relação de tensão-deformação representada na Figura 5. A curva (sob tração ou compressão) é definida pelos pontos $PT1=(\varepsilon_{sy}, \sigma_{sy})$, $PT2=(\varepsilon_{sh}, \sigma_{sh})$ and $PT3=(\varepsilon_{su}, \sigma_{su})$, e um parâmetro p que define a forma do último tramo da curva. Os valores dos parâmetros do modelo constitutivo para o aço são indicados na Tabela 3.

A fim de simular o processo de abertura e propagação de fendas do betão, o diagrama trilinear $\sigma_n^{cr} - \varepsilon_n^{cr}$ representado na Figura 6 foi adotado. As propriedades mecânicas do betão utilizadas nas simulações numéricas são apresentadas na Tabela 4.

A Figura 7 apresenta o modelo adotado para simular as tensões de corte no betão. Os dados necessários para descrever o modelo constitutivo são a resistência ao corte ($\tau_{t,p}^{cr}$) e a energia de fratura ao corte do material ($G_{f,s}$). Note-se que neste trabalho um parâmetro de retenção constante de tensões de corte do betão fendilhado (β) igual a 0,2 foi utilizado. Maiores detalhes sobre o modelo constitutivo podem ser encontrados em ROTS e BORST (1987) e VENTURA-GOUVEIA et. al (2008).

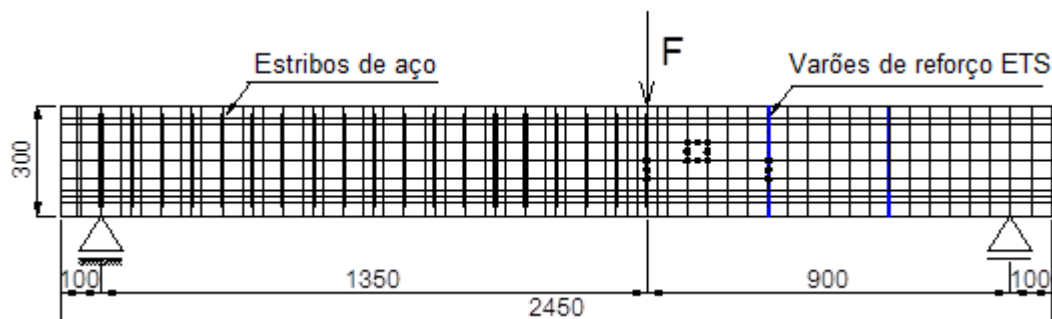


Figura 8 – Exemplo de malha de elementos finitos adoptada na simulação numérica (dimensões em mm).

Tabela 3 – Valores dos parâmetros utilizados no modelo constitutivo do aço (Figura 5)

Steel bar Diameter (mm)	PT1 $\varepsilon_{sy} [-] / \sigma_{sy} (MPa)$	PT2 $\varepsilon_{sh} [-] / \sigma_{sh} (MPa)$	PT3 $\varepsilon_{su} [-] / \sigma_{su} (MPa), [psi]$	p
6	$2.750 \times 10^{-3} / 559.14$	$2.000 \times 10^{-2} / 708.14$	$5.000 \times 10^{-2} / 708.93$	1
8	$2.660 \times 10^{-3} / 566.50$	$2.533 \times 10^{-2} / 675.73$	$5.000 \times 10^{-2} / 675.73$	1
10	$2.660 \times 10^{-3} / 541.60$	$2.405 \times 10^{-2} / 643.23$	$5.000 \times 10^{-2} / 643.23$	1
12	$2.350 \times 10^{-3} / 484.68$	$2.302 \times 10^{-2} / 655.00$	$5.000 \times 10^{-2} / 655.53$	1
25	$2.270 \times 10^{-3} / 507.68$	$3.450 \times 10^{-3} / 608.75$	$2.052 \times 10^{-2} / 743.41$	1

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do betão utilizadas nas simulações numéricas

Módulo de Poisson (ν_c)	0.15
Módulo de Elasticidade (E_c)	31100 N/mm ² (Betonagem 1) 30590 N/mm ² (Betonagem 2)
Resistência à compressão (f_c)	30.78 N/mm ² (Betonagem 1) 28.81 N/mm ² (Betonagem 2)
Diagrama trilinear de amolecimento ou de endurecimento ⁽¹⁾	$f_{ct} = 2.0$ N/mm ² ; $G_f = 0.06$ N/mm $\xi_1 = 0.01$; $\alpha_1 = 0.5$; $\xi_2 = 0.5$; $\alpha_2 = 0.2$
Diagrama trilinear de amolecimento ou de endurecimento ⁽¹⁾	$f_{ct} = 1.8$ N/mm ² ; $G_f = 0.05$ N/mm $\xi_1 = 0.01$; $\alpha_1 = 0.4$; $\xi_2 = 0.5$; $\alpha_2 = 0.2$
Parâmetro que define a energia de fratura do modo I disponível para a nova fenda (SENA-CRUZ, 2004)	$n = 2$
Parâmetros que definem o amolecimento no diagrama tensão-deformação de corte do betão fendilhado	$\tau_{t,p}^{cr} = 1.38$ N/mm ² ; $G_{f,s} = 0.5$ N/mm; $\beta = 0.2$
Parâmetros que definem o endurecimento no diagrama tensão-deformação de corte do betão fendilhado	$\tau_{t,p}^{cr}$ $\tau_{t,p}^{cr} = 1.38$ N/mm ² ; $G_{f,s} = 0.7$ N/mm; $\beta = 0.2$
Largura da banda de fendilhação	Raiz quadrada da área de influência do ponto de integração de Gauss
Ângulo para formação de nova fenda (SENA-CRUZ, 2004)	$\alpha_{th} = 30^\circ$
Número máximo de fendas por ponto de integração	2

⁽¹⁾ $f_{ct} = \sigma_{n,1}^{cr}$; $\xi_1 = \varepsilon_{n,2}^{cr} / \varepsilon_{n,u}^{cr}$; $\alpha_1 = \sigma_{n,2}^{cr} / \sigma_{n,1}^{cr}$; $\xi_2 = \varepsilon_{n,3}^{cr} / \varepsilon_{n,u}^{cr}$; $\alpha_2 = \sigma_{n,3}^{cr} / \sigma_{n,1}^{cr}$ (Figura 6)

4.1 Apresentação e análise dos resultados

A tabela 5 apresenta os resultados obtidos experimentalmente e numericamente para as vigas de betão armado reforçadas ao corte com varões embebidos aplicados segundo a técnica ETS. Nesta tabela, V_c , V_s e V_f são as contribuições do betão, estribos de aço e dos varões aplicados segundo a técnica ETS para o cálculo da resistência ao esforço transversal no programa experimental (V^{exp}). Esta tabela também apresenta a carga e o esforço transversal máximo registados nas simulações numéricas, assim como a relação entre os resultados obtidos experimentalmente e numericamente. O desempenho preditivo dos modelos numéricos foi avaliado por meio da simulação das vigas ensaiadas. Na Figura 9 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total e o deslocamento no ponto de aplicação da carga das vigas das Séries A. Nestas figuras uma linha horizontal correspondente à máxima carga obtida no programa experimental também é apresentada.

Tabela 5 – Resultados obtidos via análise numérica vs programa experimental.

Provete		Experimental				Femix		
		V_c (kN)	V_s (kN)	V_f (kN)	V^{exp} (kN)	F_{FEM} (kN)	V_{FEM} (kN)	$\frac{V^{exp}}{V_{FEM}}$
Série A	Referência	65.32	-----	-----	65.32	110.02	66.01	0.99
	S300.90		33.48	-----	98.80	171.31	102.79	0.96
	E300.90		-----	31.15	96.47	166.54	99.92	0.96
	E300.45		-----	57.07	122.39	193.45	116.07	1.05
	S300.90/ E300.90		33.48	40.30	139.10	201.57	120.94	1.15
	S300.90/ E300.45		33.48	47.85	146.65	237.72	142.63	1.03
	S225.90		42.87	-----	108.19	176.87	106.12	1.02
	S225.90/ E225.90		42.87	38.31	146.50	232.09	139.25	1.05

A análise dos resultados apresentados na Figura 9 e Tabela 5 permite constatar a boa concordância entre os resultados experimentais obtidos por DALFRÉ et. al (2011) com os dados obtidos nos modelos numéricos, simulando com boa precisão o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas ao corte com varões embebidos aplicados segundo a técnica a técnica ETS. O bom desempenho do modelo também é visível quando se comparam as tensões da armadura longitudinal de aço, dos estribos e dos varões de reforço ETS, o que significa que a hipótese de aderência perfeita na ligação aço/adesivo e betão é aceitável, pelo menos no ponto de vista do projeto para estados limites de serviço e estados limites últimos.

Os padrões de fissuração das vigas de concreto (último incremento de carga convergente) estão representados na Figura 10. De acordo com os resultados obtidos observa-se que a resposta numérica é próxima da experimental e que os numéricos conseguem capturar, com boa precisão, a localização e distribuição das fendas de corte.

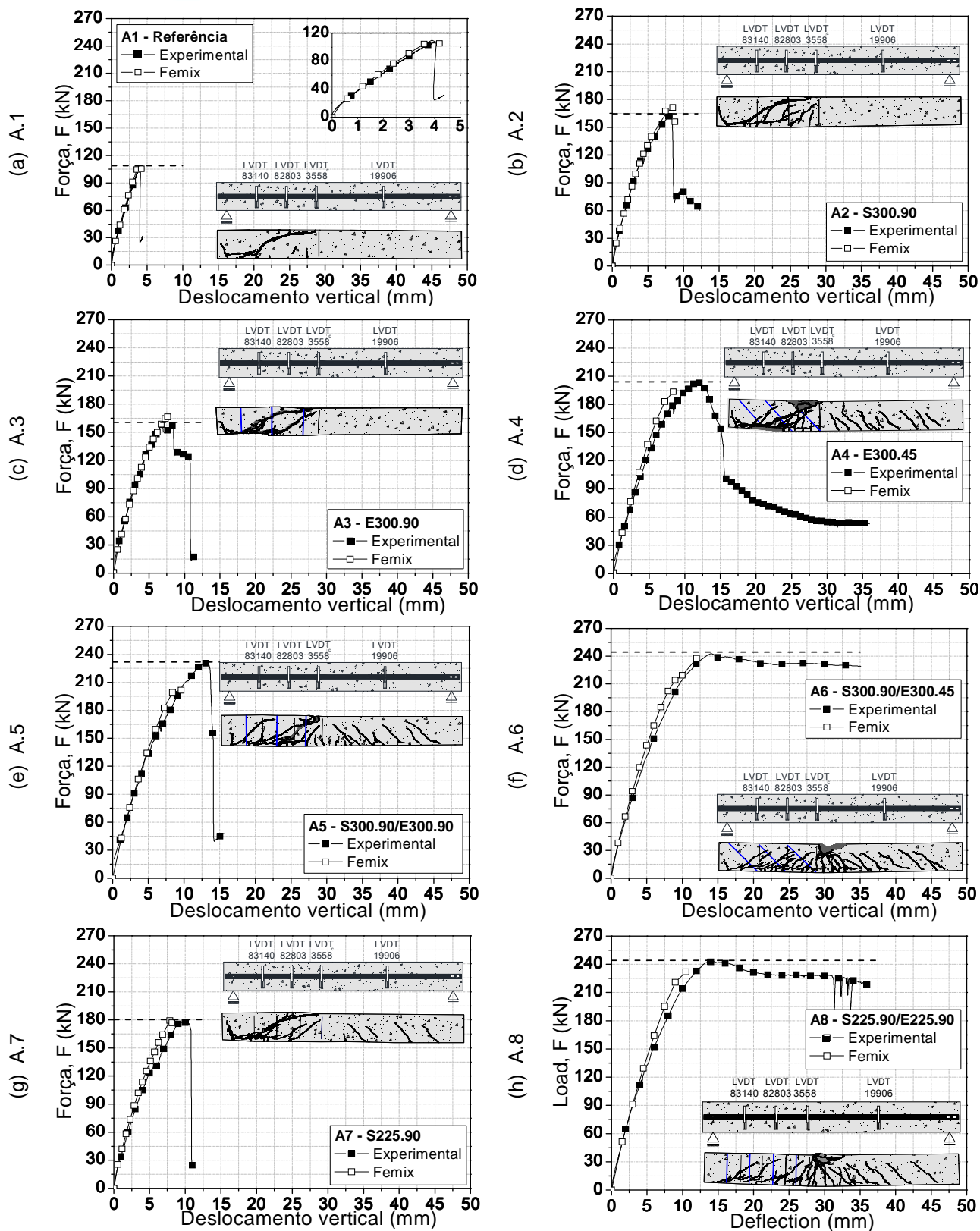


Figura 9 - Relação força-deslocamento vertical na região no ponto de aplicação da carga para as vigas da série A.

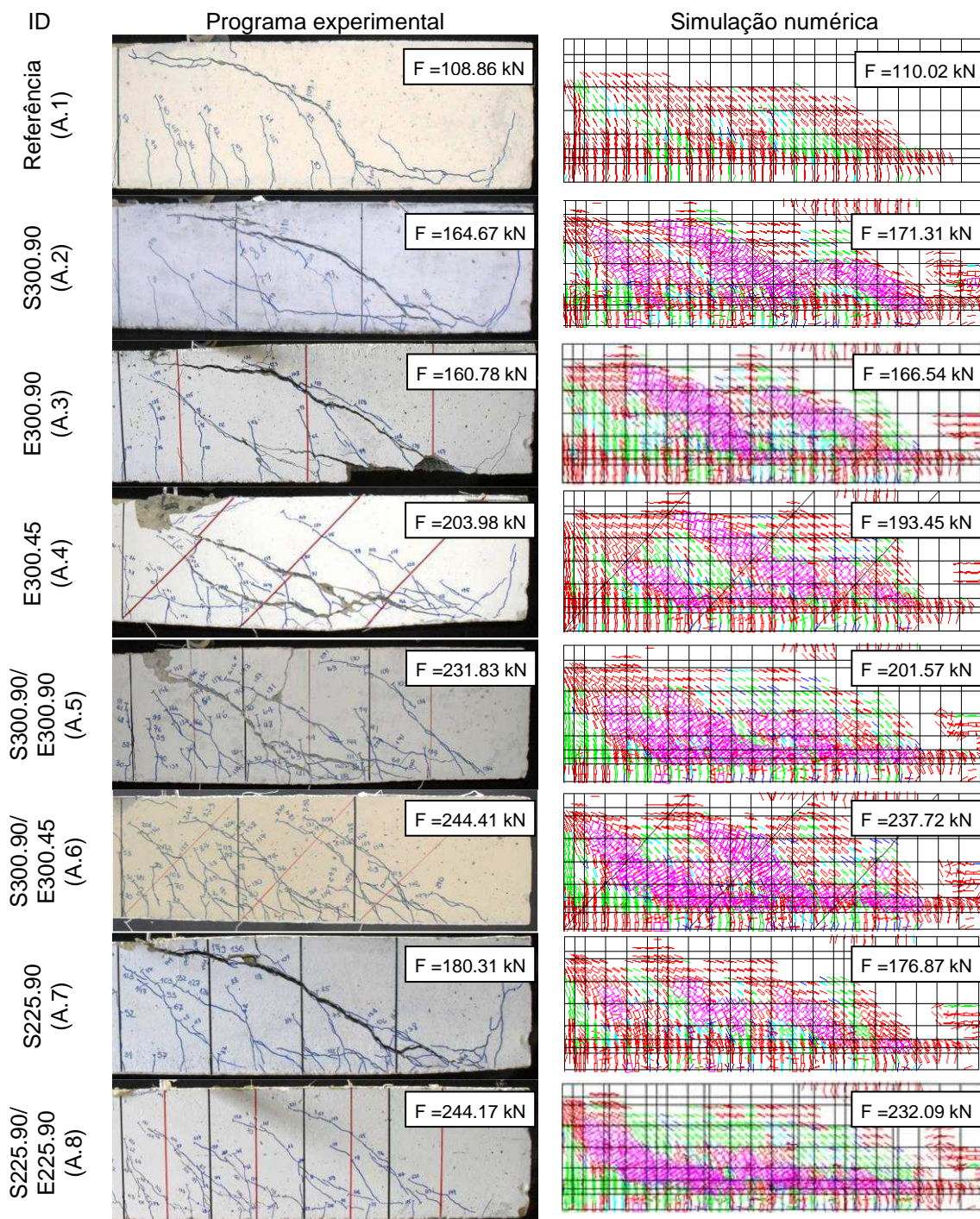


Figura 10 - Padrão de fissuração das vigas da Série (em rosa: fendas completamente abertas; em vermelho: fendas em processo de abertura; em azul: fendas em processo de fechamento).

5 Conclusões



No presente trabalho uma nova técnica de reforço (ETS) foi utilizada para aumentar a capacidade de carga de elementos com rotura por corte. Esta técnica baseia-se na inserção de varões em furos efetuados nas peças de betão armado a reforçar. Os varões são fixos ao betão por intermédio de adesivo epoxídico. Concretamente, analisou-se o desempenho das soluções de reforço utilizando-se (i) estribos de aço verticais, (ii) varões de reforço ETS verticais e inclinados a 45° e (iii) reforço composto por estribos de aço verticais e varões de reforço ETS, verticais ou inclinados.

As principais conclusões extraídas deste trabalho de investigação foram às seguintes:

- (i) A técnica ETS com varões de aço no reforço ao corte permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga de vigas de betão armado, independentemente da orientação dos varões. De um modo geral os reforços proporcionaram acréscimos de rigidez, de capacidade de carga máxima e de deformação na rotura.
- (ii) Das soluções de reforço ao corte aplicadas em vigas com determinada percentagem de estribos convencionais de aço, a constituída por varões inclinados a 45° foi a que garantiu melhor desempenho em termos de carga máxima e capacidade deformacional da viga.
- (iii) A solução de reforço ETS em vigas com determinada percentagem de estribos permitiu, em alguns casos, a mudança do modo de rotura frágil por corte a dúctil por flexão.
- (iv) Verificou-se a viabilidade de utilização da técnica proposta no reforço ao corte, dado que a rotura frágil dos provetes submetidos a esforços de corte é evitada, obtendo-se aumentos significativos na capacidade de carga e de deformação dos elementos reforçados, bem como níveis muito apreciáveis de resistência residual após a carga máxima.
- (v) Usando os resultados experimentais obtidos, a capacidade de um programa de computador baseado no Método dos Elementos Finitos para prever o comportamento deste tipo de estruturas até ao seu colapso foi destacada. Boa correlação entre os resultados experimentais e numéricos de deformação e padrão de fissuração das vigas testadas foram obtidos.

6 Agradecimentos

O primeiro autor manifesta também o seu agradecimento ao apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Brasil, bolsa GDE 200953/2007-9. Agradece-se o apoio da FCT por intermédio do projeto PTDC/ECM/114511/2009.

Referências

BARROS, J.A.O., DALFRÉ, G.M., TROMBINI, E. e APRILE, A. **Exploring the possibilities of a new technique for the shear strengthening of RC elements**. Proceedings of the International Conference Challenges for Civil Construction, 2008.

BASLER, M., WHITE, D. e DESROCHES, M. **Shear strengthening with bonded CFRP L-shaped plates**. Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, ACI International SP-215, Editors: Sami Rizkalla and Antonio Nanni, pp. 373-384, 2003.



CHAALLAL, O., MOFIDI, A., BENMOKRANE, B. e Neale, K. **Embedded Through-Section FRP Rod Method for Shear Strengthening of RC Beams: Performance and Comparison with Existing Techniques.** Journal of Composites for Construction, May/June, 374-383, 2011.

DALFRÉ, G. BARROS, J. e TROMBINI, E. **Análise do desempenho de uma nova técnica de reforço ao corte para elementos estruturais de betão armado.** BE2008 – Encontro Nacional de Betão Estrutural, 2008.

DALFRÉ, G. M., BARROS, J. A. O. e MACHADO, D. **Varões embebidos para o reforço ao corte de vigas de betão armado.** In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto (CBC2011/Ibracon), Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto (CBC2011/Ibracon), Florianópolis, 2011.

De LORENZIS e NANNI, A. **Shear strengthening of reinforced concrete beams with near surface mounted fiber-reinforced polymer rods.** ACI Structural Journal, vol. 98, nº1, January-February, pp.60-68, 2001.

DIRAR, S.H., MORLEY, C. e Lees, J. **Effect of effective depth and longitudinal steel ratio on the behaviour of precracked reinforced concrete T-beams strengthened in shear with CFRP fabrics.** Proceedings of FRPRCS-8, 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures University of Patras, Patras, Greece, 2007.

Especificação do LNEC E397. **BETÕES – Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão,** LNEC, Portugal, Maio, 1993.

ISO 527-5. **Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites.** International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp., 1993.

ROTS, J.G. e De BORST, R. **Analysis of mixed-mode fracture in concrete.** Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 113(11), pp. 1739-1758, 1987.

SENA-CRUZ, J. M. **Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips,** PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Minho, Guimarães, Portugal, 2004.

VALERIO, P., IBELL, T. J. e DARBY, A. P. **Shear Assessment and Strengthening of Contiguous-Beam Concrete Bridges Using FRP Bars.** Proceedings of the FRPRCS-7, 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, Kansas City, EUA, 825 – 848, 2005.

VALERIO, P., IBELL, T. J. e DARBY, A. P. **Deep embedment of FRP for concrete shear strengthening.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures and Buildings, 162, SB5, 311–321, 2009.

VENTURA-GOUVEIA, A., BARROS, J. A. O., AZEVEDO, A. e SENA-CRUZ, J. M. **Multi-fixed smeared 3D crack model to simulate the behavior of fiber reinforced concrete structures.** CCC 2008 - Challenges for Civil Construction, 2008.

VENTURA-GOUVEIA, A. **Constitutive models for the material nonlinear analysis of concrete structures including time-dependent effects.** PhD thesis, University of Minho, Portugal, 2012.



Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2013
Outubro / 2013



@ 2013 - IBRACON - ISSN 2175-8182

VIANA, R. D. de A. **Programa para dimensionamento de reforço à flexão e ao corte de vigas de betão armado.** Rio de Janeiro, RJ – Brasil, Junho, 130 pp, 2004.